

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 669.539.382:669.17:669.14.018:539.27

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.004

## **ПРОЧНОСТНЫЕ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ**

**Михаил Анатольевич Порфирьев<sup>1†</sup>, Виктор Евгеньевич Громов<sup>2</sup>, Юрий Федорович Иванов<sup>3</sup>, Юлия Андреевна Шлярова<sup>4</sup>, Роман Евгеньевич Крюков<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 4, 5</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

<sup>3</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

<sup>1</sup> mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>

<sup>2</sup> gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>3</sup> yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

<sup>4</sup> rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

<sup>5</sup> rek\_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

**Аннотация.** Для двух рельсовых сталей с содержанием углерода (масс. %) 0,73 % и 0,91 %, из которых изготавливаются рельсы категории ДТ 350 общего назначения и ДТ 400 ИК – повышенной износостойкости и контактной выносливости ГОСТ Р51685-2013 и ТУ 24.10.75111-208-05757676 2017 РЖД выполнен анализ механических, трибологических свойств, дислокационной субструктуры и фазового состава. Показано, что при одноосном сжатии условный предел текучести составляет ~ 1100 МПа, прочности (2160-2220) МПа для заэвтектоидной стали и ~ 1000 МПа и (1750-1830) МПа для доэвтектоидной стали, соответственно. Установлено, что рельсы специального назначения категории ДТ 400 ИК обладают более высокими значениями микротвердости (в 1,2 раза), износостойкости (в 3,7 раза), коэффициента трения (в 1,5 раза), скалярной плотности дислокаций (в 1,3 раза). Обсуждены физические причины наблюдаемых различных количественных параметров для двух сталей. Структура рельсов ДТ 350 представлена пластинчатым перлитом (0,75 объемной доля), зернами феррито-карбидной смеси (0,23 объемной доли) и структурно-свободного феррита. Структура рельсов категории ДТ 400 ИК состоит из перлита (0,98) и карбидной фазы (0,02); основной фазой является твердый раствор на основе  $\alpha$ -Fe и карбид железа Fe<sub>2</sub>C. Выявленное увеличение параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -Fe 0,28736 нм, превышающее табличное значение, может быть обусловлено наличием в кристаллической решетке до 0,0167 вес. % С.

**Ключевые слова:** сжатие, рельсы, механические свойства, трибологические свойства, деформационные кривые.

**Благодарности:** Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

---

**Для цитирования:** Порфирьев М.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Крюков Р.Е. Прочностные, трибологические свойства и структурно-фазовые состояния рельсовых сталей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 2. С. 176–183. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.004.

---

Original article

## STRENGTH, TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL-PHASE STATES OF RAIL STEELS

Mikhail A. Porfiriev<sup>1</sup>, Victor E. Gromov<sup>2</sup>, Yurii F. Ivanov<sup>3</sup>, Yulia A. Shliarova<sup>4</sup>, Roman E. Kryukov<sup>5</sup><sup>1,2,4,5</sup>Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia<sup>3</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia<sup>1</sup>mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739><sup>2</sup>gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343><sup>3</sup>yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958><sup>4</sup>rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427><sup>5</sup>rek\_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

**Abstract.** For two rail steels with a carbon content (wt. %) of 0.73 % and 0.91 %, from which rails of the general purpose category DT 350 and DT 400 IK – increased wear resistance and contact endurance GOST R51685-2013 and TU 24.10.75111-208-05757676 2017 RZhd are made an analysis of mechanical, tribological properties, dislocation substructure and phase composition is performed. It is shown that under uniaxial compression the conditional yield strength is ~ 1100 MPa, strength (2160-2220) MPa for hypereutectoid steel and ~ 1000 MPa and (1750-1830) MPa for hypoeutectoid steel, respectively. It has been established that special-purpose rails of category DT 400 IK have higher values of microhardness (by 1.2 times), wear resistance (by 3.7 times), friction coefficient (by 1.5 times), scalar dislocation density (by 1.3 times). The physical reasons for the observed different quantitative parameters for the two steels are discussed. The structure of DT 350 rails is represented by lamellar perlite (0.75 volume fraction), grains of ferrite-carbide mixture (0.23 volume fraction) and structure-free ferrite. The structure of rails of category DT 400 IK consists of pearlite (0.98) and carbide phase (0.02); the main phases are a solid solution based on  $\alpha$ -Fe and iron carbide  $Fe_3C$ . The revealed increase in the crystal lattice parameter of  $\alpha$ -Fe 0.28736 nm, exceeding the tabular value, may be due to the presence of up to 0.0167 wt. % C in the crystal lattice.

**Keywords:** compression, rails, mechanical properties, tribological properties, deformation curves.

**Acknowledgements:** The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use «Materials Science» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SibSIU».

**For citation:** Porfiriev, M. A., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Shliarova, Yu. A. & Kryukov, R. E. (2023). Strength, tribological properties and structural-phase states of rail steels. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(2), 176–183. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.004.

## Введение

В настоящее время на долю железнодорожного транспорта приходится основной объем грузооборота и пассажирских перевозок. Непрерывное возрастание требований к надежности рельсов в условиях высоких нагрузок на ось и скоростей движения обуславливает необходимость высокой эксплуатационной стойкости рельсов и анализа возможных причин их изъятия [1]. Знание закономерностей формирования структурно-фазовых состояний и свойств стали с перлитной структурой при производстве специальных видов рельсов необходимо как для совершенствования технологии их производства, так и предсказания поведения при эксплуатации.

Для создания рельсов с высокими эксплуатационными свойствами используется техноло-

гия дифференцированной закалки сжатым воздухом 100-метровых рельсов категории ДТ 350, производство которых в России начато в 2013 г. Производство специальных видов рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости категории ДТ 400 ИК для эксплуатации в прямых участках пути со скоростями до 200 км/час и кривых участках без ограничения по грузонапряженности осуществляется уже более трех лет.

Важность информации о структурно-фазовом состоянии, прочностных и трибологических свойствах новых видов рельсов определяется глубиной фундаментальных проблем физического материаловедения, с одной стороны, и практической значимостью проблемы, с другой, поскольку рельсы производятся из стали перлитного класса [2-7]. В работах [8-14] выполнены оценки механизмов упрочнения

рельсов при различных сроках длительной эксплуатации, различных видах деформации и проанализированы стадии трансформации пластинчатого перлита [1, 15, 16].

Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ механических и трибологических свойств рельсов из до- и заэвтектоидных стали.

### Материал и методики исследования

В качестве материала исследования использовали образцы доэвтектоидной Э76ХФ и заэвтектоидной стали Э90ХАФ, свойства и элементный состав которой регламентируется ГОСТом 51685-213, ТУ 24.10.75111-298-05757676.2017, ТУ 0921-276-01124333-2021 РЖД. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами 6,6x4,7x4,7 мм и вырезались из средней части головки 100-метровых дифференцированно-закаленных рельсов ДТ 350 и ДТ 400 ИК. Рельсы категории ДТ 350 – дифференцированно-упрочненные общего назначения, рельсы категории ДТ 400 ИК – повышенной износостойкости и контактной выносливости. Выбор схемы нагружения (сжатие) обусловлен тем, что в процессе эксплуатации рельсы подвергаются именно такому виду деформации. Деформацию одноосным сжатием осуществля-

ли на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 1,2 мм/мин. Измерение микротвердости стали осуществляли на приборе ПМТ-3 методом Виккерса при нагрузке на индентор 0,5 Н. Трибологические свойства характеризовали параметром износа и коэффициентом трения. Испытания проводили в условиях сухого трения по схеме диск-палец на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, радиус трека износа 2 мм, путь, пройденный контртелом, 50 м, скорость вращения образца 25 мм/с, нагрузка на индентор 2 Н, температура комнатная. Профиль канавки износа и ее параметры исследовали контактным нанопрофилометром (рис.1, 2). Параметр изнашивания) рассчитывали по формуле  $V = \frac{2\sigma RA}{F} \cdot L$ , где  $R$  – радиус трека (мм),  $A$  – площадь поперечного сечения канавки износа (мм<sup>2</sup>),  $F$  – величина приложенной нагрузки (Н),  $L$  – пройденная шариком контртела дистанция (м) [17]. Дислокационная субструктура определялась методами просвечивающей электронной микроскопии (прибор JEOL JEM 2100 F) [18-20].

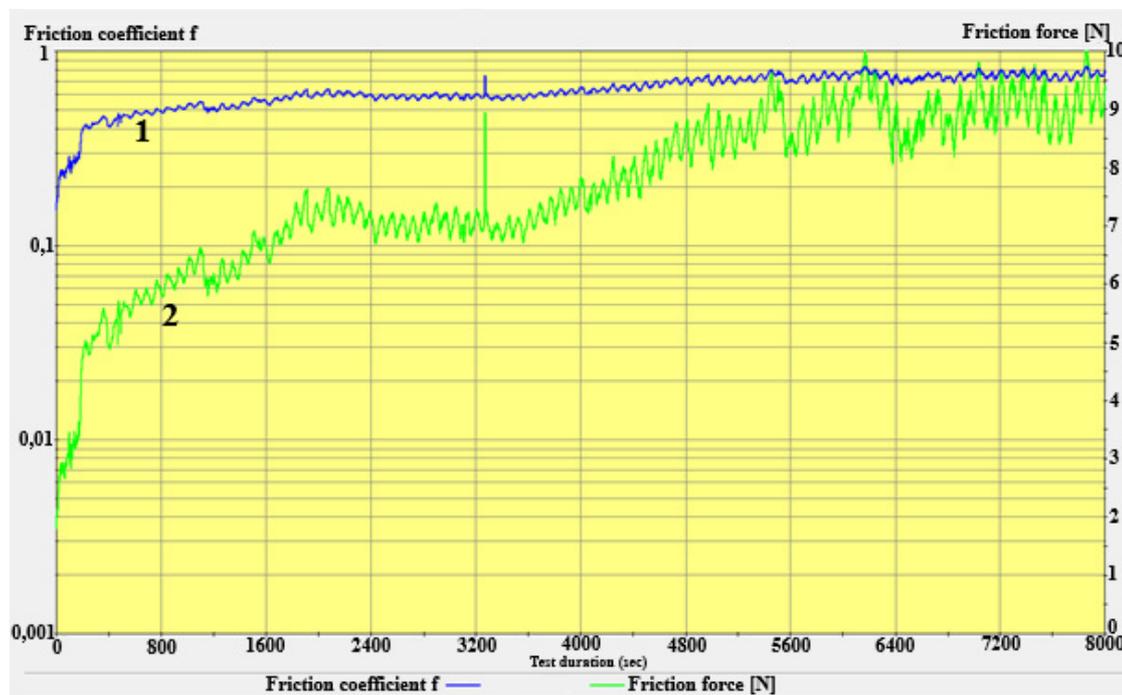
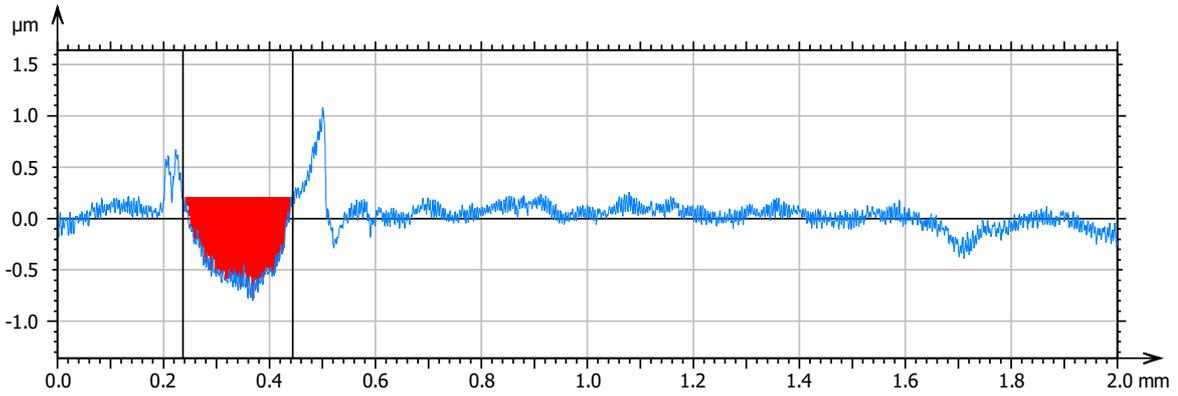


Рис.1. Зависимость коэффициента трения (кривая 1) и силы трения (кривая 2) от времени трибологических испытаний образцов рельсов категории ДТ 400 ИК

Fig.1. Dependence of friction coefficient (curve 1) and friction force (curve 2) on the time of tribological tests of samples of rails of category DT 400 IK



Parameters	Value	Unit
Maximum depth	1.03	μm
Area of the hole	135	μm <sup>2</sup>

Рис.2. Профиль дорожки трения образцов рельсов категории ДТ 400 ИК ( $k = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  $\mu = 0,63$ )

Fig.2. Friction track profile of rail specimens of category DT 400 IK ( $k = 0.96 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $\mu = 0.63$ )

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис.3 приведены машинные деформационные кривые, полученные при одноосном сжатии образцов рельсов категории ДТ 350 и ДТ 400 ИК. Как правило, изменение площади поперечного сечения образцов при таком способе нагружения не учитывается, поэтому рассматриваемый график следует называть услов-

ной диаграммой сжатия материала. Образцы исследуемых сталей при испытании на сжатие не удалось довести до разрушения, т.е. для них не может быть корректно определен предел прочности при сжатии. Это объясняется тем, что исследуемая сталь способна весьма сильно деформироваться без разрушения и образцы сплющиваются, т.е. наблюдается эффект потери формы образцов.

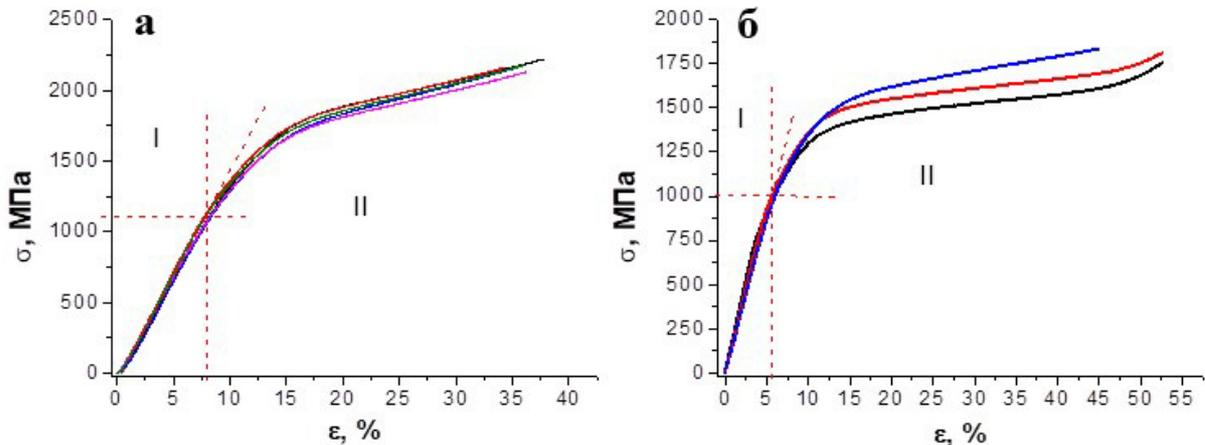


Рис.3. Деформационные кривые при сжатии образцов рельсов категории ДТ 400 ИК (а) и ДТ 350 (б). Пунктирными линиями указан предел текучести

Fig.3. Deformation curves during compression of samples of rails of category DT 400 IK (a) and DT 350 (b). Dotted lines indicate the yield strength

На деформационных кривых (рис.3) можно выделить стадию линейной (стадия I) и стадию (II) пластической деформации с параболической функциональной зависимостью вида:

$$\sigma = \sigma_0 + \theta \varepsilon^n$$

где  $\sigma_0$  = предел текучести;  $\theta(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon$  – коэффициент деформационного упрочнения;

$n < 1$  – показатель деформационного упрочнения [21].

Анализируя представленные результаты, можно отметить, что на деформационных кривых отсутствует площадка текучести. Следовательно, можно определить лишь условный предел текучести, т.е. напряжение, соответствующее

шее переходу к параболической зависимости  $\sigma(\epsilon)$ . Выполненные оценки показали, что для категории рельсов ДТ 400 ИК оно составляет  $\approx 1100$  МПа, для ДТ 350  $\approx 1000$  МПа. «Условный» предел прочности рельсов категории ДТ 400 ИК составляет (2160-2220) МПа; для рельсов категории ДТ 350 он заметно ниже и составляет (1750-1830) МПа. При этом пластичность рельсов из заэвтектонидной стали в 1,4 раза ниже пластичности стали доэвтектонидной.

Установлено, что для рельсов категории ДТ 400 ИК микротвердость стали HV = (473-492), а для ДТ 350 HV = 410. Проведенные трибологические испытания сталей установили, что для рельсов категории ДТ 400 ИК параметр износа  $k = 1,5 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м; коэффициент трения  $\mu = 0,63$ . Соответствующие трибологические характеристики для рельсов категории ДТ 350 выглядят следующим образом:  $k = 5,5 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м;  $\mu = 0,42$ . Таким образом, рельсы категории ДТ 400 ИК повышенной износостойкости и контактной выносливости имеют более высокие значения микротвердости, износостойкости и коэффициента трения, относительно рельсов категории ДТ 350 общего назначения. Скалярная плотность дислокаций, измеренная методом секущих с поправкой на невидимость дислокаций [18-20] составила  $4 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> и  $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> для рельсов категории ДТ 350 и ДТ 400 ИК, соответственно. Такое различие в параметрах механических и трибологических свойств, дислокационной субструктуры в основном определяется различным содержанием углерода (0,73 % для рельсов ДТ 350 и 0,91 % для ДТ 400 ИК) и особенностями различной технологии дифференцированной закалки.

Структура рельсов ДТ 350 представлена зернами перлита пластинчатой морфологии, зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита пластинчатой и глобулярной формы и зернами структурно-свободного феррита. Их объемная доля составляет 0,75; 0,22 и 0,03, соответственно. Структура рельсов категории ДТ 400 ИК содержит  $\approx 0,98$  перлита и около 0,02 вторичных карбидов.

Рентгенофазовый анализ рельсов категории ДТ 400 ИК показал, что основной (95,8 мас. %) фазой стали является твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа (ОЦК кристаллическая решетка). Второй фазой (4,2 мас. %) исследуемой стали является карбид железа Fe<sub>2</sub>C ( $a = 0,47313$  нм,

$b = 0,43299$  нм,  $c = 0,28330$  нм) (рис.4). Параметр кристаллической решетки  $\alpha$ -железа  $a = 0,28736$  нм, что существенно больше табличного значения параметра кристаллической решетки чистого  $\alpha$ -железа ( $a = 0,28668$  нм) [22]. Можно предположить, что основной причиной увеличения параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -железа является наличие в твердом растворе атомов углерода. Используя выражения, представленные в [22, 23], проведены оценки концентрации атомов углерода в кристаллической решетке  $\alpha$ -железа. Показано, что выявленное увеличение параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -железа может быть обусловлено наличием в кристаллической решетке (позиции внедрения) 0,0167 вес. % углерода.

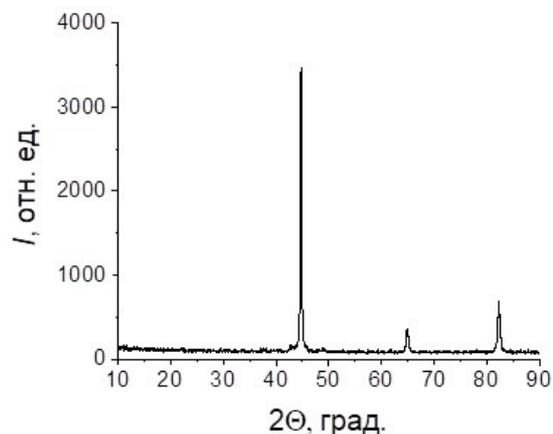


Рис.4. Участок рентгенограммы, полученный с образца рельсов категории ДТ 400 ИК

Fig.4. X-ray section obtained from a sample of rails of category ДТ 400 ИК

### Заключение

Методами современного физического материаловедения проведен анализ механических и трибологических свойств, структуры, дислокационной субструктуры, фазового состава 100-метровых дифференцированно закаленных доэвтектонидных (категория ДТ 350) и заэвтектонидных (категория ДТ 400 ИК) рельсов. При испытаниях на сжатие условный предел текучести составляет (1100) МПа, прочности (2160-2220) МПа для рельсов категории ДТ 400 ИК и 1000 МПа (1750-1820) МПа для рельсов категории ДТ 350, соответственно. Показано, что рельсы категории ДТ 400 ИК имеют более высокие значения микротвердости (в 1,2 раза), износостойкости (в 3,7 раза), коэффициента трения (в 1,5 раза), скалярной плотности дислокаций (в 1,3 раза). Обсуждены возможные причи-

ны наблюдаемых различий в количественных параметрах.

### Список литературы

1. Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC, 2021. 190 p.
2. Pan R., Ren R., Chen C., Zhao X. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear // *Materials Characterization*. 2017. V. 132. P. 397–404.
3. Vinogradov A., Estrin Y. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation // *Progress in Materials Science*. 2018. V. 95. P. 172–242.
4. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion // *Acta Materialia*. 2003. V. 51, N 18. P. 5555–5570.
5. Yahyaoui H., Sidhom H., Braham C., Baczanski A. Effect of inter-lamellar spacing on the elastoplastic behavior of C70 pearlitic steel: Experimental results and self-consistent modeling // *Materials & Design*. 2014. V. 55. P. 888–897.
6. Ветер В.В., Жулейкин С.Г., Игнатенко Л.Н., Коваленко В.В., Громов В.Е., Попова Н.А., Козлов Э.В. Градиентные структуры, возникающие при пластической деформации перлитной стали // *Известия АН. Серия физическая*. 2003. Т. 67, № 10. С. 1375–1379.
7. Wang Y., Tomota Y., Harjo S., Gong W., Ohmura T. In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. V. 676. P. 522–530.
8. Ivanov Yu.A., Gromov V.E., Yuriev A.A., Kormyshev V.E., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 11. P. 710–718.
9. Юрьев А.А., Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Длинномерные рельсы: структура и свойства после сверхдлительной эксплуатации. Новокузнецк: Полиграфист, 2022. 311 с.
10. Ivanov Yu.F., Yuriev A.A., Chen X., Kosterev V.B., Gromov V.E. Physical nature of strengthening mechanisms during extremely long-term operation of rails // *Известия АлтГУ. Физика*. 2021. № 1(117). С. 33–39.
11. Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // *Materials Letters*. 2022. V. 309. P. 131378.
12. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Qin R.S., Peregudov O.A., Aksenova K.V., Semina O.A. Degradation of structure and properties of rail surface layer at long-term operation // *Materials Science and Technology*. 2017. V. 33(12). P. 1473–1478.
13. Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov I. Y.F. Microstructure of quenched rails. Cambridge: ISP Ltd, 2016. 153 p.
14. Gromov V.E., Yuriev A.A., Peregudov O.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Semin A.P. Physical nature of surface structure degradation in long term operated rails // *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 1909. No. 020066.
15. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Аксенова К.В., Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е., Ващук Е.С. Эволюция структуры рельсовой стали при сжатии // *Деформация и разрушение материалов*. 2022. № 8. С. 9–14.
16. Аксенова К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С., Перегудов О.А. Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при деформации сжатием // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022. № 10. С. 43–48.
17. Беркович И.И., Громоковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. Самара. Изд-во СамГУ, 2000. 268 с.
18. Egerton F.R. Physical principles of electron microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
19. Kumar C.S.S.R. Transmission electron microscopy. Characterization of nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.
20. Carter C.B., Williams D.B. Transmission electron microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.
21. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Киев: Наукова думка, 1989. 256 с.
22. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 236 с.
23. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.В., Козлов Э.В., Громов В.Е. Закаленная конструкционная

сталь: структура и механизмы упрочнения. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. 174 с.

### Информация об авторах

М. А. Порфирьев – научный сотрудник управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМиОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

Роман Евгеньевич Крюков – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии черных металлов Сибирского государственного индустриального университета.

### References

1. Yuriev, A. A., Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Rubannikova, Yu. A., Starostenkov, M. D. & Tabakov, P. Y. (2021). Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC. 190 p.
2. Pan, R., Ren, R., Chen, C. & Zhao, X. (2017). Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear. *Materials Characterization*, 132, 397–404.
3. Vinogradov, A. & Estrin, Y. (2018). Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 95, 172–242.
4. Ivanisenko, Yu., Lojkowski, W., Valiev, R. Z. & Fecht, H.-J. (2003). The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion. *Acta Materialia*, 51(18), 5555–5570.
5. Yahyaoui, H., Sidhom, H., Braham, C. & Baczmanski, A. (2014). Effect of interlamellar spacing on the elastoplastic behavior of C70 pearlitic steel: Experimental results and self-consistent modeling. *Materials & Design*, 55, 888–897.
6. Veter, V. V., Zhuleykin, S. G., Ignatenko, L. N., Kovalenko, V. V., Gromov, V. E., Popova, N. A. & Kozlov, E. V. (2003). Gradient structures formed by plastic deformation of perlite steel. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*, 67(10), 1375–1370. (In Russ.).
7. Wang, Y., Tomota, Y., Harjo, S., Gong, W. & Ohmura, T. (2016). In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel. *Materials Science and Engineering: A*, 676, 522–530.
8. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Yuriev, A. A., Kormyshev, V. E., Rubannikova, Yu. A. & Semin, A. P. (2021). Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 710–718.
9. Yuriev, A. A., Kuznetsov, R. V., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F. & Shliarova, Yu. A. (2022). Long-dimensional rails: structure and properties after extra-long operation. Novokuznetsk: Polygraphist. 311 p.
10. Ivanov, Yu. F., Yuriev, A. A., Chen, X., Kosterev, V. B. & Gromov, V. E. (2021). Physical nature of strengthening mechanisms during extremely long-term operation of rails. *Izvestiya of Altai State University*, 1(117), 33–39.
11. Ivanov, Yu. F., Glezer, A. M., Kuznetsov, R. V., Gromov, V. E., Shliarova, Yu. A., Semin, A. P. & Sundeev, R. V. (2022). Fine structure formation in rails under ultra long-term operation. *Materials Letters*, 309, 131378.
12. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Qin, R. S., Peregudov, O. A., Aksenova, K. V. & Semina, O. A. (2017). Degradation of structure and properties of rail surface layer at long-term operation. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 33(12), 1473–1478.
13. Gromov, V. E., Yuriev, A. B., Morozov, K. V. & Ivanov, Y. F. (2016). Microstructure of quenched rails. Cambridge, ISP Ltd. 153 p.
14. Gromov, V. E., Yuriev, A. A., Peregudov, O. A., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F., Glezer, A. M., Semin, A. P. (2017). Physical nature of surface structure degradation in long term operated rails. *AIP Conference Proceedings*, 1909, 020066.
15. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Aksenova, K. V., Kuznetsov, R. V., Kormyshev, V. E. & Vashchuk, E. S. (2022). Evolution of the structure of rail steel under compression, *Deformatsiya i Razrushenie materialov*, 8, 9–14. (In Russ.).

16. Aksenova, K. V., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Vashchuk, E. S. & Peregudov, O. A. (2022). Evolution of the structure of lamellar perlite of rail steel during compression deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 10, 43–48. (In Russ.).
17. Berkovich, I. I. & Gromkovskiy, D. G. (2000). Tribology. Physical foundations, mechanics and technical applications. Samara. Publishing house of SamGU. 268 p.
18. Egerton, F. R. (2016). Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing. 196 p.
19. Kumar, C. S. S. R. (2014). Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer. 717 p.
20. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing. 518 p.
21. Trefilov, V. I., Moiseev, V.F. & Pechkovsky, E. P. (1989). Strain hardening and destruction of polycrystalline metals. Kyiv: Naukova Dumka. 256 p.
22. Kurdyumov, V. G., Utevsky, L. M. & Entin, R. I. (1977). Transformations in iron and steel. M.: Nauka. 236 p.
23. Ivanov, Yu. F., Kornet, E. V., Kozlov, E. V. & Gromov, V. E. (2010). Hardened structural steel: structure and hardening mechanisms. Novokuznetsk: Publishing House of SibGIU. 174 p.

#### **Information about the authors**

*M. A. Porfiriev – Researcher, Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University.*

*V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.*

*Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.*

*Yu. A. Shliarova – Post-graduate Student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing (EM&OP), Siberian State Industrial University.*

*R. E. Kryukov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was received by the editorial board on 10 Apr. 23; approved after reviewing 24 Apr. 23; accepted for publication 10 May 23.